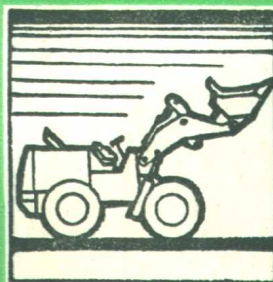
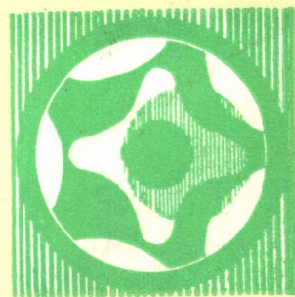


高等学校试用教材



活塞式压缩机

西安交通大学郁永章 主编



机械工业出版社

高等学校试用教材

活塞式压缩机

西安交通大学郁永章 主编



机械工业出版社

TH457
8.5

活塞式压缩机

西安交通大学郁永章 主编

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 $\frac{1}{16}$ ·印张 20 $\frac{3}{4}$ ·字数 508 千字

1982年1月重庆第一版·1983年10月重庆第二次印刷

印数 5,301—12,800 · 定价 2.15 元

*

统一书号: 15033·6072

主要符号一览表

A	面积	K_x, K_y	横向的刚性系数
A_p	活塞面积	k	比热比, 理想气体绝热过程指数, 接触面比压
A_v	阀隙通流截面积	k_V	容积绝热指数
A_c	阀座通道截面积	k_T	温度绝热指数
A_i	阀片复盖处的阀座通道截面积	M	马赫数, 力矩, 弯矩
a	音速, 加速度	M_y	阻力矩
B	宽度, 调节百分比	M_d	驱动力矩
C_V	定容摩尔比热	M_N	倾复力矩
C_P	定压摩尔比热	M_I	惯性力矩
c_V	定容质量比热	m	质量, 多方膨胀指数
c_p	定压质量比热	m_w	每分钟从空气中分离出的水质量
D	气缸直径	m_i	质量百分比
d	直径	m_s	往复质量
d_a	外径	m_r	旋转质量
d_i	内径	m_0	平衡重质量
E	弹性模数	\bar{m}	质量流量
F	力	N	功率, 侧向力, 克分子数
F_g	气体力	N_i	指示功率
F_l	连杆力	N_m	摩擦功率
F_s	气阀弹簧力	N_z	轴功率
G	重量, 横向弹性模数	n	压缩过程多方指数, 转速
g	重力加速度	p	压力
h	比焓, 阀片升程, 高度	p_0	标准状态压力
h_0	气阀弹簧预压缩量	p_s	进气压力, 水蒸汽分压力
I	惯性力	p_d	排气压力
I_1	一阶惯性力	Q	排气量, 热量
I_x	二阶惯性力	Q_d	末级排出的气体容积
I_r	离心力	Q_e	析出的水分折合成进气状态的流量
i	回转半径, 数	Q_c	中间抽气折合成进气状态的流量
J	截面惯性矩	Q_N	供气量
J_{xy}	对 xy 面惯性矩	Q_l	气体泄漏量
l	长度	Q_g	气体释放的热量
K	弹簧刚性系数 (一般指轴线方向的), 磨损因子, 换热系数	Q_w	水蒸汽的放热量
K_x	轴线方向的刚性系数	q_0	汽化潜热

R	气体常数, 法向力	Δ	磨损量
R_0	通用气体常数	δ	间隙, 厚度, 相对压力脉动, 飞轮旋转不均匀度
R_m	混合气体常数	δ_0	总相对压力损失
r	半径	δ_s	进气相对压力损失
r_o	外半径	δ_d	排气相对压力损失
r_i	内半径	e	名义压力比
S	熵	e'	实际压力比
s	比熵, 活塞行程, 厚度	e_z	总压力比
T	绝对温度	ϵ_0	一级最佳压力比
T_0	标准温度	η	减振效率, 动力粘度
T_s	进气温度	η_m	机械效率
T_d	排气温度	η_{i-is}	等温指示效率
t	摄氏温度, 厚度	η_{is}	等温轴效率
U	内能, 湿周长	η_{ad}	绝热轴效率
u	比内能	η_{is-ad}	等温绝热效率
V	容积	λ	曲轴半径与连杆长度比, 杆件柔度, 导热系数, 气体与管壁摩擦系数
V_i	活塞行程容积	λ_V	容积系数
V_0	余隙容积	λ_p	压力系数
v	比容	λ_T	温度系数
v_c	临界比容	λ_l	泄漏系数
v_r	对比比容	λ_o	析水系数
v_m	活塞平均速度	λ_d	排气系数
v_v	阀隙气流速度	θ	角度, 温度差
\bar{v}_v	阀隙气流平均速度	θ_m	平均温度差
W	功	μ	分子量, 摩擦系数
W_i	指示功	ν	相对泄漏量, 运动粘度, 泊桑系数
W_m	摩擦功	ν_c	气阀相对泄漏量
W_z	轴功	ν_r	活塞环相对泄漏量
W_{is}	等温循环功	ν_p	填料相对泄漏量
W_{ad}	绝热循环功	ν_i	容积百分比
W_{pol}	多方循环功	ξ	阻力系数, 冷却器流动特性系数
w	每公斤气体的循环功, 水流速度	ρ	密度, 曲率半径
w'	每公斤气体的过程功	σ	应力
X_i	千克分子百分比	σ_p	拉伸应力
Z	气体压缩性系数	σ_y	压缩应力, 挤压应力
Z_c	临界压缩性系数	σ_W	弯曲应力
Z_m	混合气压缩性系数	τ	剪切应力
z	压缩机级数, 一根连杆螺栓数, 一个气阀弹簧数	φ	相对湿度, 角度
α	流量系数, 相对余隙容积, 线性膨胀系数, 放热系数	χ	绝对湿度
β	连杆摆角, 升力系数, 体膨胀系数	ω	角速度, 激励圆频率
γ	比重量	ω_n	固有圆频率

主要单位一览表

名 称	单 位	代 号
质 量	千克 (克、毫克)	kg (g, mg)
长 度	米 (厘米、毫米、微米)	m (cm, mm, μm)
时 间	分钟 (小时、秒)	min (h, s)
温 度	度 (绝对)	K
热 量	焦耳 (仟焦耳)	J (kJ)
力、重量	牛	N
压 力	牛/米 ²	N/m ²
容 积	米 ³	m ³
比 容	米 ³ /千克	m ³ /kg
密 度	千克/米 ³	kg/m ³
克分子体积	摩尔 (仟摩尔)	mol (kmol)
流量、排气量	米 ³ /分 (米 ³ /小时)	m ³ /min (m ³ /h)
转 速	转/分	r/min
角速度	1/秒	1/s
功	牛·米 (仟瓦小时)	N·m (kW·h)
功 率	瓦 (仟瓦)	W (kW)
克分子比热	焦耳/摩尔·度	J./mol·K
质量比热	焦耳/千克·度	J/kg·K
运动粘度	泊·秒	Pa·s

前 言

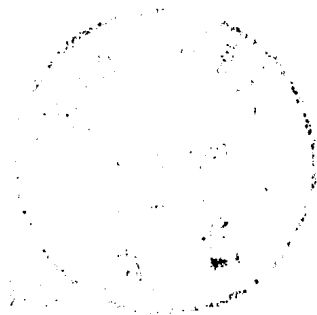
本书系根据一九七八年高等学校一机部对口专业座谈会精神和本专业教材会议拟定的大纲编写的高校教材。在内容上着重讲述活塞式压缩机的基本工作原理和机器结构、零部件、辅助设备的一般设计原则。

书中应用了国际单位制，但为了从工程单位制过渡方便起见，压力均以 $1 \text{ kg/cm}^2 = 10^5 \text{ N/m}^2$ 代替，且在没有特别说明时，均指绝对压力；时间单位仍以分钟计，所以排气量单位仍为 m^3/min ，转速单位为 r/min 。

本书由西安交通大学郁永章主编。参加编写的有：石华鑫——第三章、第四章 § 4-1、第五章；林梅——第十章；孙嗣莹——第十四章；郁永章——其余部分。

华中工学院谈庆才、杨乐之、叶树椿、钟型义等同志审阅了本书；西安交大杨绍侃、陈永江同志对本书的编写提出了宝贵意见，并审阅了部分稿件；在本书的编写过程中，还得到了压缩机行业许多工厂和研究所的热情帮助，在此，一并表示感谢。

本书责任编辑——郝育生。



目 录

绪 论.....	1	第九章 滑动密封	181
第一章 压缩机级的工作过程.....	12	§ 9-1 滑动密封原理	181
§ 1-1 气体的热力性质.....	12	§ 9-2 活塞环结构设计及计算	186
§ 1-2 压缩机级的理论循环.....	21	§ 9-3 填料及填料函	193
§ 1-3 压缩机级的实际循环.....	26	§ 9-4 密封元件材料	197
§ 1-4 多级压缩	35	第十章 气 阀.....	202
第二章 压缩机的热力性能.....	43	§ 10-1 气阀的工作过程	202
§ 2-1 排气压力	43	§ 10-2 压力损失	204
§ 2-2 排气量	44	§ 10-3 气阀弹簧	210
§ 2-3 排气温度	49	§ 10-4 阀片升程	216
§ 2-4 功率和效率	51	§ 10-5 气阀结构型式	219
§ 2-5 热效率和比功率	57	第十一章 润 滑.....	226
第三章 单列压缩机中作用力的分析... 59		§ 11-1 润滑油	226
§ 3-1 压缩机中的作用力	59	§ 11-2 气缸润滑	229
§ 3-2 作用力的分析	64	§ 11-3 曲轴、连杆润滑	232
第四章 惯性力平衡及减振设计	68	第十二章 冷 却.....	242
§ 4-1 惯性力及力矩的平衡	68	§ 12-1 冷却器结构	242
§ 4-2 减振设计	81	§ 12-2 冷却器换热原理及计算	251
第五章 动力计算及转矩均衡.....	94	§ 12-3 冷却系统	258
§ 5-1 气体力指示图	94	第十三章 调 节.....	261
§ 5-2 惯性力图	97	§ 13-1 排气量调节的方法	261
§ 5-3 摩擦力图	100	§ 13-2 调节系统及调节器	271
§ 5-4 列的活塞力图	100	第十四章 气体管路及管系设备	276
§ 5-5 切向力图和法向力图	102	§ 14-1 管路设计	276
§ 5-6 飞轮矩的确定	105	§ 14-2 缓冲器	283
第六章 压缩机结构设计及原动机		§ 14-3 液气分离器	285
选择	108	§ 14-4 滤清器	289
§ 6-1 结构方案	108	§ 14-5 安全阀	291
§ 6-2 结构参数和转速	113	§ 14-6 消声器	293
§ 6-3 活塞行程及气缸直径确定	116	第十五章 热力计算及结构实例	300
§ 6-4 原动机选择	117	§ 15-1 热力计算	300
§ 6-5 压缩机装置实例	120	§ 15-2 变工况热力计算	305
第七章 气缸部分主要零件设计.....	123	§ 15-3 结构实例	309
§ 7-1 气缸	123	附录	
§ 7-2 活塞	139	表 1 常用气体物理性质	317
§ 7-3 活塞杆	148	表 2 各种温度时的水蒸汽饱和	
第八章 机座部分主要零件设计.....	151	蒸汽压及密度	318
§ 8-1 曲轴	151	常用气体的压缩性系数图	318
§ 8-2 连杆	159	主要参考资料	326
§ 8-3 十字头	171		
§ 8-4 机身	174		

绪 论

压缩机是一种用于压缩气体借以提高气体压力的机械，它的种类很多、用途极广。在绪论中我们将介绍各种型式的压缩机、它们的用途、压缩机的历史以及它们的发展等。

一、压缩机的种类

首先，按照压缩气体的原理，压缩机可区分为容积式和速度式两大类。

1. 容积式压缩机 它是使气体直接受到压缩，从而使气体容积缩小、压力提高的机械。一般这类压缩机具有装盛气体的气缸，以及压缩气体的活塞。按照活塞运动方式的不同，它又有往复式和回转式两种结构型式；且为了称呼的方便，在我国把前者简称为“活塞式压缩机”，后者简称为“回转式压缩机”。

(1) 活塞式压缩机 如图 0-1 所示，在圆筒形气缸中具有一可往复运动的活塞，气缸上有控制进、排气的阀门。当活塞作往复运动时，气缸容积便周期地变化，借以实现气体的吸进、压缩和排出。

活塞的往复运动，可有多种驱动方式：当原动机主轴作旋转运动时，可通过曲轴连杆机构（图 0-2, a）把

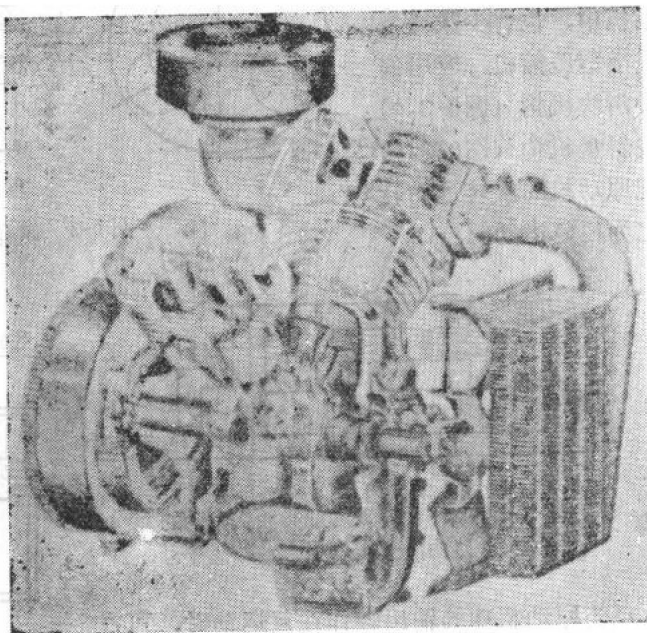


图 0-1 活塞式压缩机

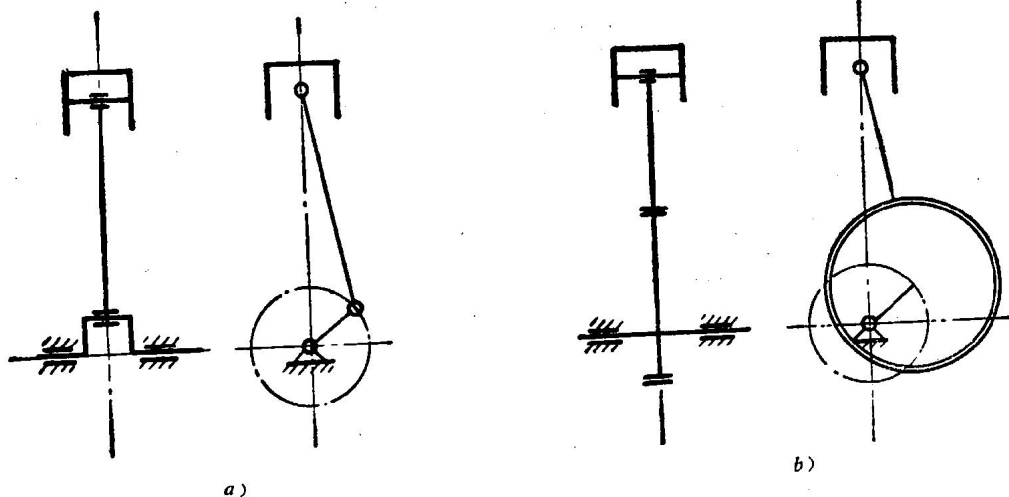


图 0-2 曲轴连杆机构及偏心连杆机构

旋转运动转化为往复运动，在压缩机中，这种机构应用最普遍，图 0-1 中的压缩机便是应用曲轴连杆机构的；也可应用偏心轮连杆机构（图 0-2, b），但由于偏心轮尺寸不宜过大，故一般仅用于小型压缩机中；此外，在往复式压缩机中，也有少数微型或小型压缩机，应用偏心滑块机构（图 0-3, a）或斜盘机构（图 0-3, b）把原动机的旋转运动转化为往复运动的。

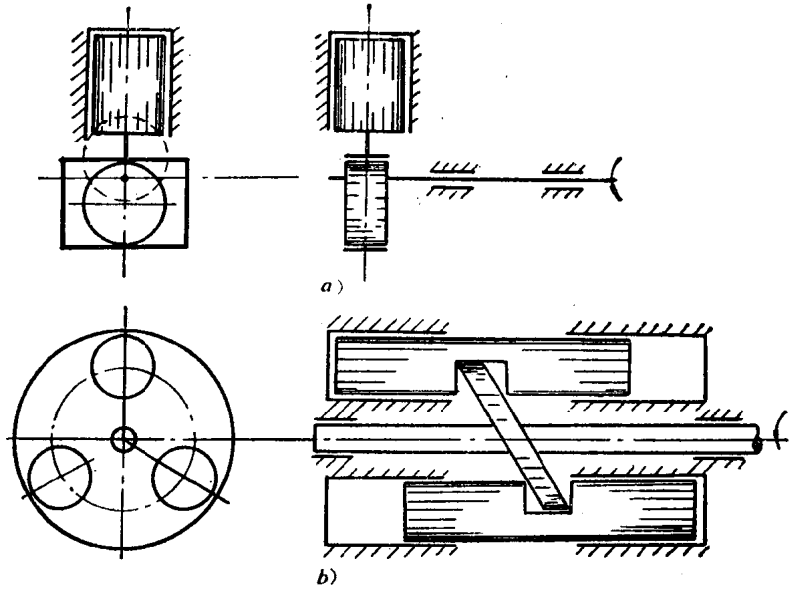


图 0-3 偏心滑块机构及斜盘机构

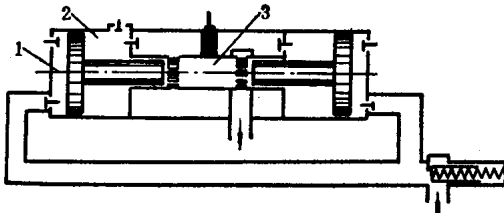


图 0-4 二冲程对置活塞柴油机驱动的自由活塞压缩机

当原动机功的输出轴作往复运动时，可直接驱动压缩机的活塞。图 0-4 所示为由二冲程对置活塞柴油机驱动的结构，图中中间部分 3 是柴油机气缸和活塞，两端即图中 1 是压缩机的气缸和活塞。因为在这类结构中，活塞不像一般压缩机中那样受曲轴连杆机构运动规律的控制，而仅决定于气体压力及运动件质量，故称为自由活塞压缩机。

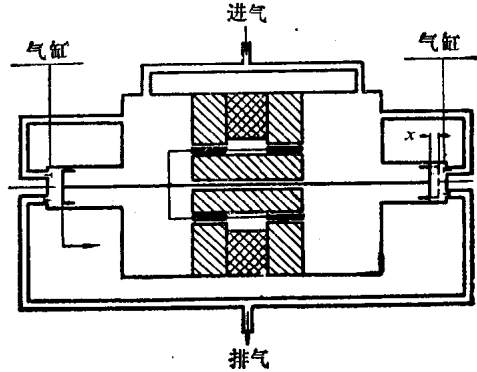


图 0-5 往复电动机驱动的自由活塞压缩机

图 0-5 所示为另一种自由活塞压缩机，它是由电磁往复机构驱动的，图中中间部位为电动机，两端则为压缩机。

还有一种原动机本身虽作旋转运动，但它首先驱动一个往复泵，

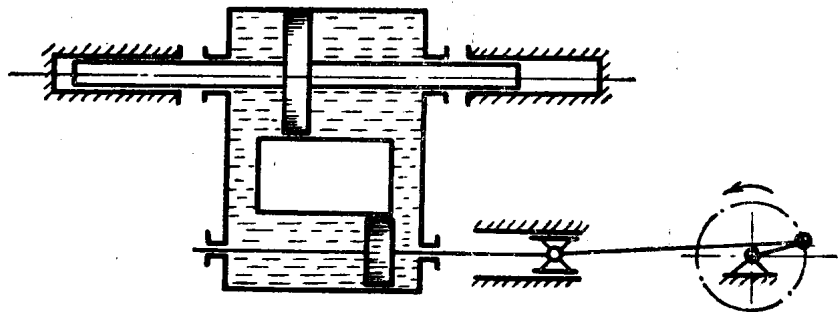


图 0-6 液压驱动的活塞式压缩机

如图 0-6 中下部所示；由泵造成的液压再来驱动压缩机活塞，如图 0-6 中的上部所示。

膜式压缩机，如图 0-7 所示，也属液压驱动的一类，但在膜式压缩机中，活塞的作用已为一膜片所代替。

此外，还有一种利用地势、依靠水位的高度来压缩气体的系统，称为液力压缩气体系统，如图 0-8 所示，它是由一个水泵似的叶轮，将水和空气的混合物一起打入一个位置很低的容器中，然后在容器中水、气相分离，容器中的气体被液体的重力所压缩。

(2) 回转式压缩机 它的气缸形式不

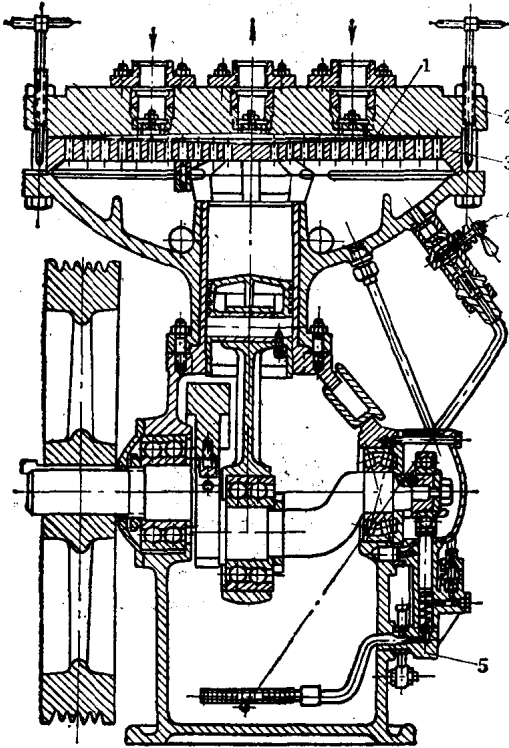


图 0-7 膜式压缩机

1—膜片 2—盖板 3—支板 4—泄液阀 5—补油泵

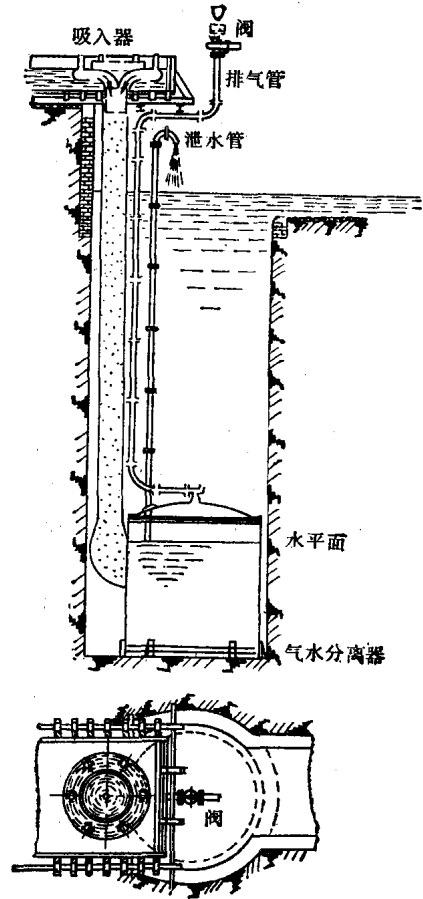


图 0-8 液力压缩气体系统

一，气缸中可能具有一个或两个可作旋转运动的活塞——称为转子。按照转子的结构、以及容积变化的特点等，回转式压缩机也有许多种，常见的有：

转子式压缩机 如图 0-9 所示，在圆筒形气缸内设置一圆柱形转子，气缸上设有一可以滑动的密封片；转子绕偏心轴旋转时，气缸、转子和密封片三者所形成的容积周期地变化，借以实现气体的吸进、压缩和排出。这种结构的压缩机，转子旋转一周，完成一次气体工作循环。

滑片式压缩机 如图 0-10 所示，在圆筒形气缸内偏心地配置一个圆柱形转子，转子上开有若干切槽，其内放置滑片；转子旋转时，滑片在离心力的

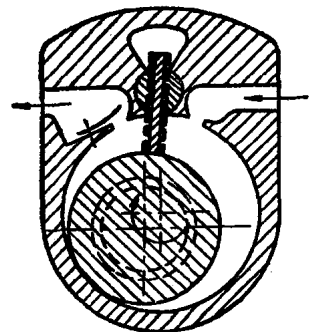


图 0-9 转子式压缩机

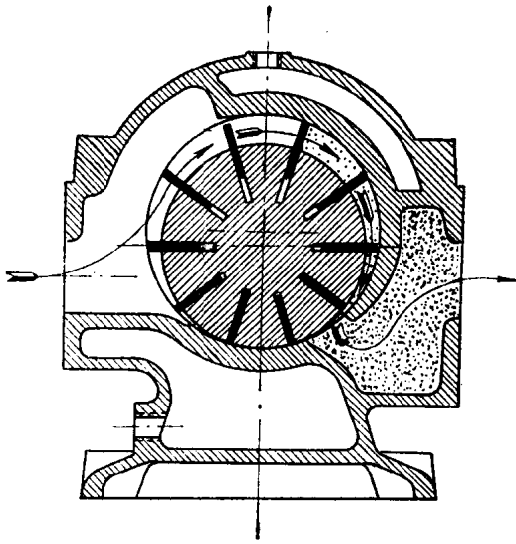


图 0-10 滑片式压缩机

作用下端部压紧在气缸上，气缸、转子和滑片三者形成一周期地变化的容积。这种结构每一小室在一转中实现一次气体工作循环，所以它的容积利用率较转子式高。

液环式压缩机 如图 0-11 所示，在圆筒形气缸内偏心地配置一转子，转子上具有若干固定的翅片；在气缸内充有一定数量的液体。这样，当转子旋转时，液体在离心力的作用下环布于气缸四周，并和翅片构成一个个可周期地变化的容积。

罗茨鼓风机 如图 0-12 所示，它具有一截面呈“8”字形的气缸，其中置有一对相同截面、并也为“8”字形的转子。当两转子反向旋转时，气体自进气口被送至排气口。

螺杆式压缩机 如图 0-13 所示，它的气缸截面也呈“8”字形，其中配置两个转子，一个为具有凸齿的螺杆，称为阳螺杆，另一个为具有齿槽的螺杆，称为阴螺杆；一般前者为四个齿，后者为六个槽。工作时两转子反向旋转，气体便自一端吸进，经压缩后由另一端排出。

还有一种单螺杆压缩机，如图 0-14 示，它只有一个螺杆，两边有两个分别和螺杆相啮合的叶轮。螺杆旋转时，叶轮被带着旋转，气体便自一端进入，经过压缩后由另一端排出。

2. **速度式压缩机** 它首先使气体分子获得很高的速度，然后让气体停滞下来，使动能转化为位能，即使速度转化为压力。速度式压缩机主要的型式有轴流式和离心式两种。

(1) **离心式压缩机** 如图 0-15 示，气体轴向地进入由主轴带着作高速旋转的叶轮，并随着叶轮旋转；由于离心力的作用使气体高速飞出叶轮，然后在蜗壳中转化为压力。

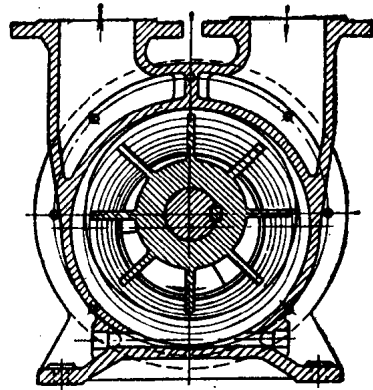


图 0-11 液环式压缩机

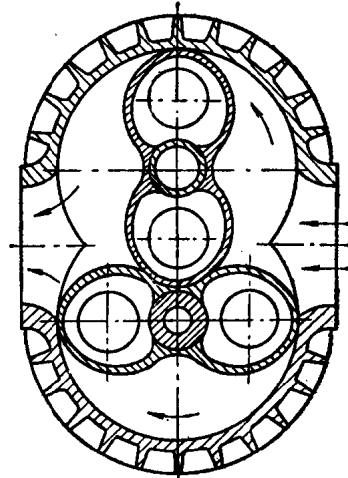


图 0-12 罗茨鼓风机

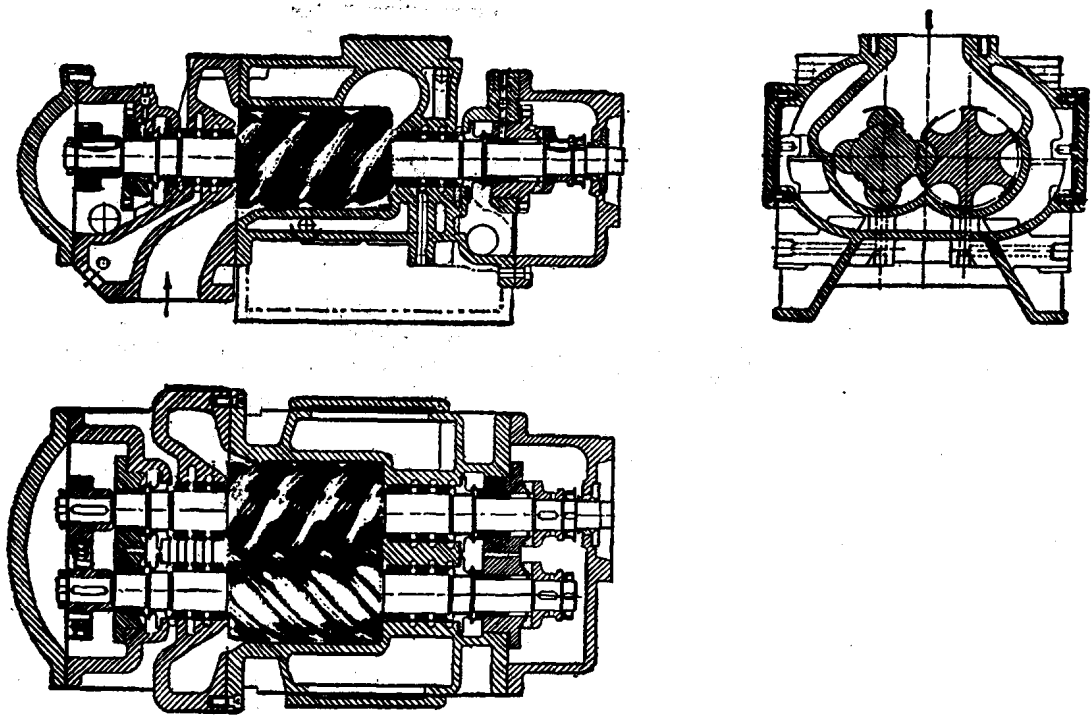


图 0-13 螺杆式压缩机

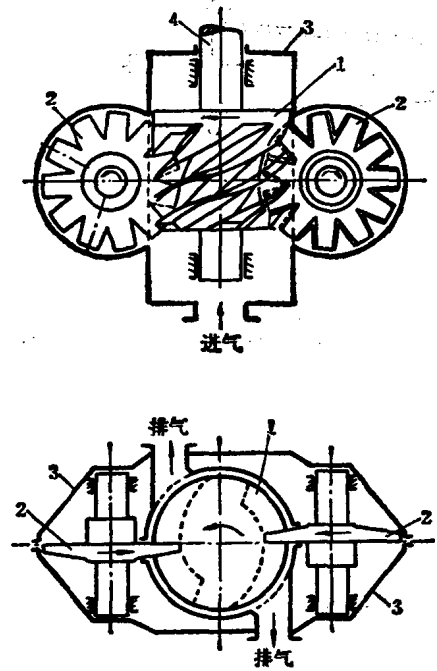


图 0-14 单螺杆压缩机
 1—螺杆 2—叶轮 3—壳体 4—主轴

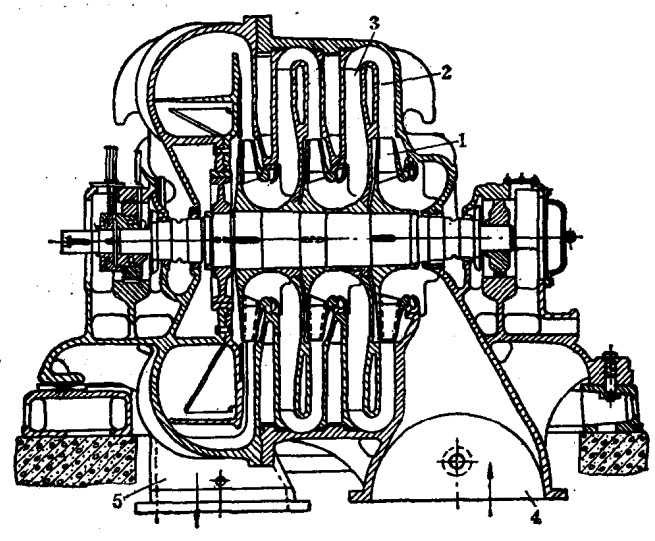


图 0-15 离心式压缩机
 1—叶轮 2—蜗壳 3—通道 4—进气口 5—排气口

(2) 轴流式压缩机 如图 0-16 示, 气体轴向地进入高速旋转的叶片, 然后被叶片推到导叶中扩压。

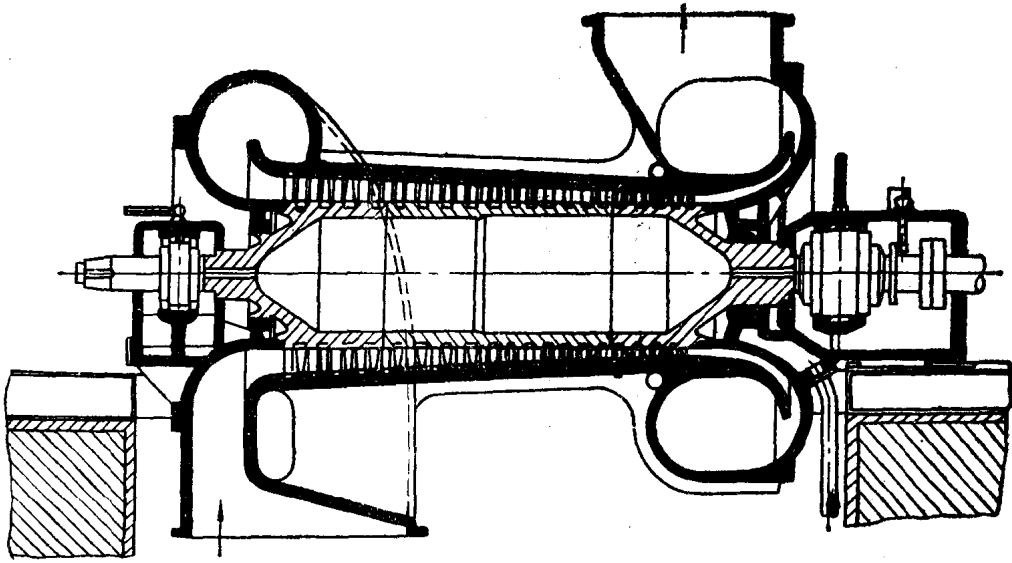


图 0-16 轴流式压缩机

(3) 喷射泵 如图 0-17 所示,也可认为是速度式压缩机,但它没有叶轮,而是依靠已经具有压力的气体,经喷嘴喷出时获得很高的速度,并把周围的无压气体带着一起前进,从而使无压气体也获得速度,然后共同经扩压管扩压,达到提高压力的目的。

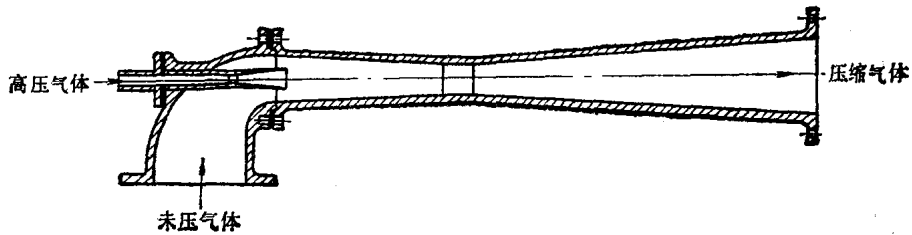


图 0-17 喷射泵

本书主要是讨论具有曲轴连杆机构的活塞式压缩机的。为了研究和称呼的方便,常将活塞式压缩机按其热力性能及结构特点,再分成以下各类型。

1. 按所达到的排气压力分:

名称	压力 ($\times 10^5 \text{N/m}^2$)
鼓风机	< 3
低压压缩机	$3 \sim 10$
中压压缩机	$10 \sim 100$
高压压缩机	$100 \sim 1000$
超高压压缩机	> 1000

2. 按排气量分:

名称	排气量 (按进气状态计) (m^3/min)
微型压缩机	< 1
小型压缩机	$1 \sim 10$

中型压缩机 10~60

大型压缩机 >60

3. 按气缸中心线与地平面的相对位置分(图 0-18):

立式压缩机——气缸中心线与地平面垂直(图0-18, a)。

卧式压缩机——气缸中心线与地平面平行,并按气缸相对机身的位置又分为:一般卧式,其气缸处于机身一侧(图0-18, b);对置式,其气缸处于机身两侧。此外,还特地把对置式压缩机中相对列活塞相向运动的结构,称为对置平衡式或对动式压缩机(图0-18, c)。

角度式压缩机——气缸中心线与地平面成一角度,并按气缸排列所呈的形状,又区分为 V 型(d)、L 型(e)、W 型(f)、倒 T 型(g)、扇型(h,i)、星型(j)等。

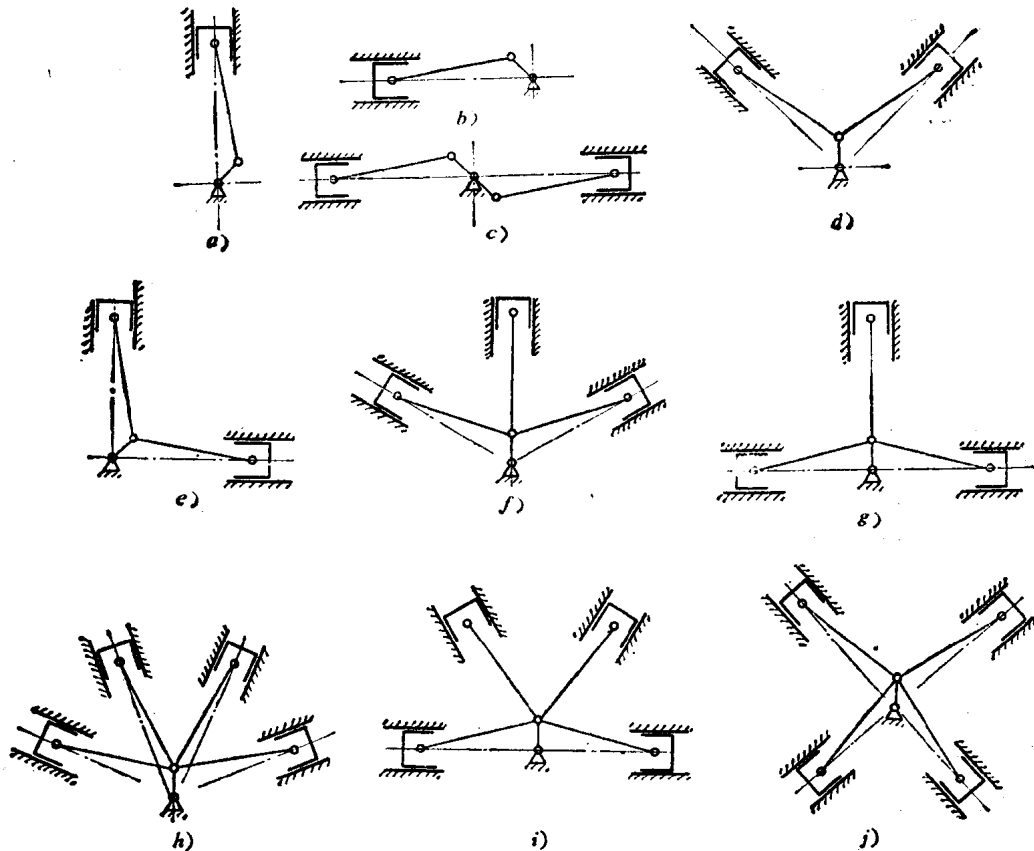


图 0-18 气缸中心线相对地平面不同位置的各种配置

4. 按气体达到终了压力所需的级数分:

单级压缩机——气体经一级压缩达终压;

两级压缩机——气体经两级压缩达终压;

多级压缩机——气体经三级以上压缩达终压。

5. 按活塞在气缸内所实现的气体压缩循环分(图 0-19):

单作用式压缩机——气缸内仅一端进行压缩循环;

双作用式压缩机——气缸内两端都进行同一级次的压缩循环;

级差式压缩机——气缸内一端或两端进行两个或两个以上不同级次的压缩循环。

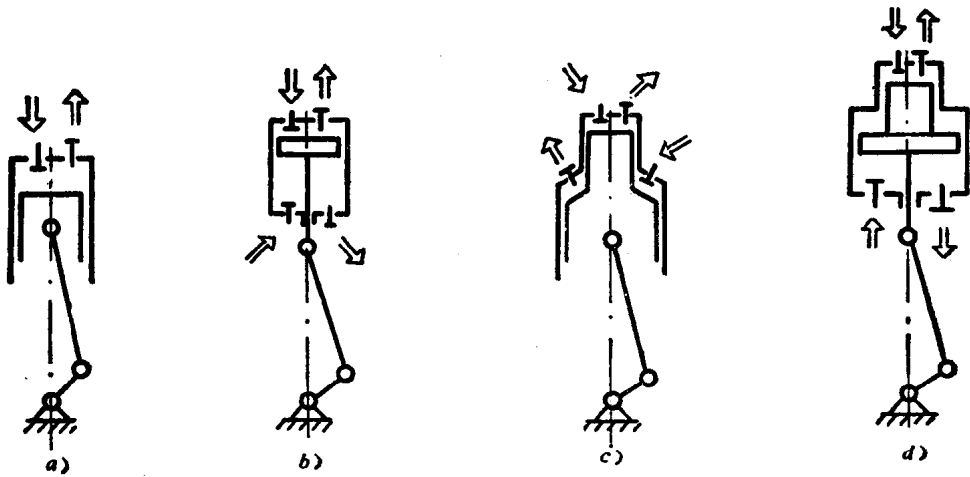


图 0-19 活塞往复一次气缸中实现的气体压缩循环
a) 单作用式 b) 双作用式 c)、d) 级差式

6. 按压缩机具有的列数分:

单列压缩机——气缸配置在机身一侧的一条中心线上;

两列压缩机——气缸配置在机身一侧或两侧的两条中心线上;

多列压缩机——气缸配置在机身一侧或两侧两条以上的中心线上。

此外, 还可按有无十字头, 分为有十字头压缩机和无十字头压缩机; 按冷却方式分为气(风)冷式压缩机和水冷式压缩机; 按机器工作地点固定与否, 分为固定式压缩机和移动式压缩机等。

二、压缩机的用途

压缩机用途极为广泛, 几乎遍及工农业、交通运输、国防、甚至生活的各个领域。下面按气体被压缩的目的, 大致区分为几类:

1. 压缩空气作为传递力能的介质 空气取之不尽用之不竭, 而用压缩空气作为传递力能的介质又具有安全的优点, 所以, 用压缩空气来驱动各种工具及器械已越来越普遍。例如用压缩空气驱动的风镐、风钻、气力扳手、造型机、车辆制动、门窗启闭, 以及控制仪表和自动化装置等; 此外, 在喷气织机中用压缩空气吹送纬纱以代替梭子; 中、大型发动机启动; 浆液搅拌; 油井压裂; 高压空气爆破采煤; 鱼雷发射; 潜艇浮沉等均需用到不同压力的压缩空气。

2. 使气体液化 气体经压缩、冷却和膨胀便能液化。液化气体蒸发可以进行人工制冷; 混合气体液化后可利用其组份的沸点不同, 逐步蒸发而彼此分离, 如分离空气得氧、氮等。此外, 液化气体还具有便于贮存及运输的优点。

3. 压缩气体利于合成 化学工业中常将合成的原料气体压缩至高压, 以利于合成反应。例如氮、氢合成氨, 二氧化碳和氢合成甲醇, 氨和二氧化碳合成尿素等。此外, 高压聚乙烯近年来得到了很大的发展, 它也是在高压下进行聚合的。

4. 输送气体 气体输送分管道输送和装瓶输送两种方式; 气体量大时由管道输送, 量小时用瓶装。管道输送时压缩气体的目的是使较小的管径输送较多的气体, 以及克服流动过程

中管道的阻力。装瓶输送时压缩气体则可使有限的容积容纳质量较多的气体。

三、压缩机型式的选择

各种类型的压缩机都有其优缺点。活塞式压缩机的优点是：

1. 不论流量大小，都能达到所需的压力——目前工业上最高压力为 $3500 \times 10^5 \text{N/m}^2$ ，实验室中达 10^9N/m^2 ；

2. 热效率高；

3. 气量调节时排气压力几乎不改变。

缺点是：

1. 机器体积大而且重，单机排气量一般小于 $500 \text{m}^3/\text{min}$ ；

2. 结构复杂，易损件多，维修工作量较大，但经过努力现在已可做到连续运行八千小时以上。

活塞式压缩机的这些优缺点，决定了它适用于处理气量不大的高压范围内。在那些各种机器都可适用的范围内，则需根据技术经济指标的分析，来确定选用哪种压缩机。图 0-20 所示为各类压缩机的经济指标的概况，压缩机的排气压力为 $8 \times 10^5 \text{N/m}^2$ 。图 0-21 为目前各类压缩机的应用范围。

四、活塞式压缩机的历史和发展

早在三、四千年前，我们的祖先便掌握了压气鼓风从事冶炼的技术，最早是由兽皮做成“皮老虎”；公元三十一年，东汉的杜诗创造了用水力鼓风的设备——水排；一直沿用到现在的木制“风箱”，可以说是现代活塞式压缩机的雏形。

到 1757 年英国人威尔肯松 (Wilkinson) 提出的一个叫做“金属风箱”的专利，它有两个气缸，由水轮机驱动。1777 年瓦特 (Watt) 进一步设计了由蒸汽驱动的压缩机。上述的机器都是单级的，主要也是用作冶炼鼓风。

1829 年和 1830 年在英国和法国相继提出了多级结构的压缩机，但当时的多级压缩机都无级间冷却。多级压缩机采用级间冷却是 1849 年由冯·雷逊 (Von Rathen) 建议的。

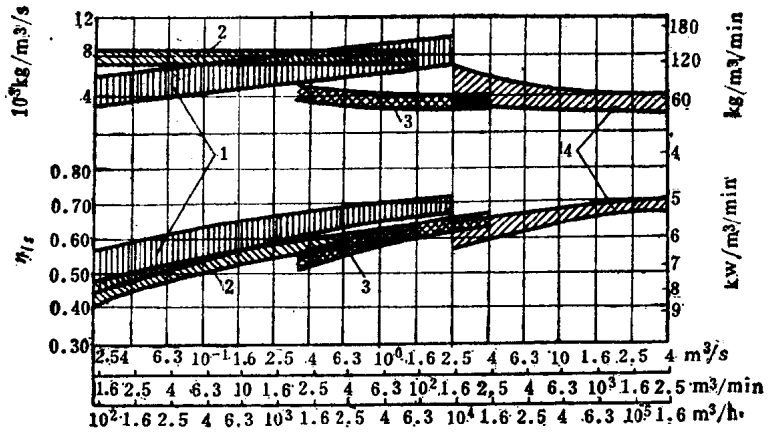


图 0-20 各类压缩机的经济指标，排气压力为 $8 \times 10^5 \text{N/m}^2$
1—两级活塞式 2—两级滑片 3—两级螺杆 4—具有中间冷却的离心式

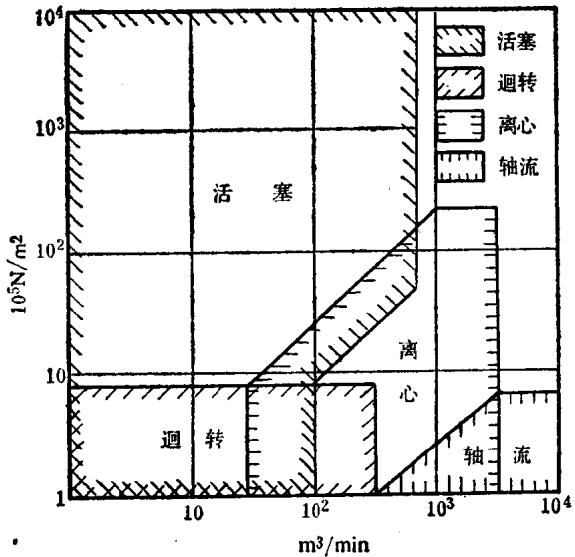


图 0-21 目前各类压缩机的应用范围